

# 新西兰木结构抗震研究进展

李明浩<sup>1</sup> Angela Liu<sup>2</sup> 董文晨<sup>3</sup>

(1. 新西兰坎特伯雷大学; 2. 新西兰建筑研究所; 3. 新西兰坎特伯雷大学)

[摘要] 新西兰的地震经验表明, 木结构作为可靠的结构体系能完全满足大震不倒的抗震设计要求。但是, 地震作用造成的结构和非结构损伤往往会造成巨额的修复费用。本文简单介绍了现代木结构在新西兰的应用, 以及相关的设计规范体系。同时, 作者对一系列轻型木结构住宅和多高层木结构的最新研究课题也做了简单介绍。其研究重点在于如何提高木结构的抗震韧性, 限制结构损伤, 控制结构变形造成的损失。

[关键词] 轻型木结构住宅; 多高层木结构; 新西兰; 抗震韧性

## Progress in Seismic Research of Wood Structures in New Zealand

Li Minghao<sup>1</sup>, Angela Liu<sup>2</sup>, Dong Wenchen<sup>3</sup>

(1. University of Canterbury; 2. BRANZ; 3. University of Canterbury)

**Abstract:** New Zealand's seismic experience shows that wood structure as a reliable structural system can fully meet the seismic design requirements of large earthquakes. However, structural and non-structural damage caused by earthquakes often results in huge repair costs. This paper briefly introduces the application of modern wood structures in New Zealand and related design specification systems. At the same time, the author also gave a brief introduction to the latest research topics of a series of light wood houses and multi-story wood structures. The research focuses on how to improve the seismic toughness of wood structures, limit structural damage, and control the losses caused by structural deformation.

**Keywords:** light wood structure residence, multi-story wood structure, New Zealand, seismic toughness

### 1 引言

新西兰拥有丰富的林业资源, 以辐射松为主的 180 万公顷的人工林可提供优质结构用木材满足本国建筑市场的需求并大量出口到海外市场。木结构强度较高, 自重轻, 特别适合像新西兰这样地震多发的国家采用。事实证明, 通过合理的设计和建造, 木结构能完全满足“大震不倒”的抗震设计性能要求并保证居民的生命安全。在 2011 年震级为 6.3 的坎特伯雷大地震中, 尽管有超过 15 万栋木结构住宅遭到不同程度的损害, 但是没有

因木结构倒塌造成人员伤亡<sup>[1]</sup>。

新西兰与北美类似, 90% 以上的住宅采用轻型木结构。全国每年大约新建 2.5 万栋住宅, 多为一到两层, 如图 1 所示。此类轻型木结构房屋的建造需要符合新西兰轻型木结构设计规范 NZS3604<sup>[2]</sup> 的要求, 其抗侧力体系通常采用木骨架石膏板剪力墙, 如图 2 所示。和一般的结构设计规范不同, NZS3604 规范主要以条文和图表的形式给出建造方法, 比如说, 根据楼面跨度, 查表得到所需木搁栅的截面大小和端部连接形式等。该

规范的制定有助于快速建造符合各项性能指标要求的房屋,可极大地降低工程设计成本。NZS3604 规范虽有一定的工程结构理论依据,但更主要是基于工程经验,其中包含了很多构造方面的要求。就抗侧力体系设计而言,NZS3604 规范仅包含了少量的设计和验算,目的在于保证相对规则的剪力墙布置和避免由偏心造成明显的平面内扭转效应。对于有门窗大开口或墙体长度不足的情况,有时需要对剪力墙体系进行特别的设计,比如说设计钢框架以保证足够的抗侧力。



图 1 根据 NZS3604 规范建造的普通一层轻型木结构住宅  
Fig. 1 A common light wooden house built according to the NZS 3604 specification

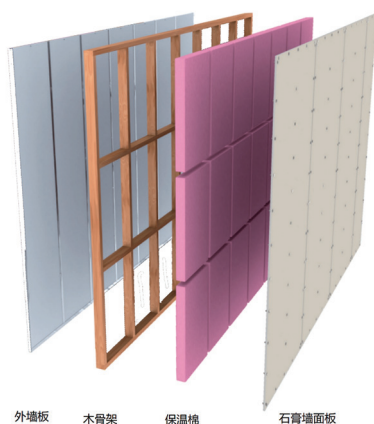


图 2 常见的木骨架石膏板墙体

Fig.2 Common wood skeleton plasterboard wall

新西兰的多高层建筑以混凝土结构或钢结构为主,但是多层木结构的应用也在逐年增加。其中一个主要原因是新西兰的工程木企业能够供应高品质的工程木产品如层板胶合木 (glulam), 正交胶合木 (CLT) 和单板层积材 (LVL) 等。近年来,少量的公共建筑和商用建筑,如图书馆、学校建筑、小型机场也采用了工程木结构体

系。在多层住宅市场,CLT 结构体系发展迅速,开始占据少量的市场份额,比如说学生公寓和养老院。但是,现有的新西兰木结构规范 NZ3603<sup>[3]</sup> 多年未更新,没有包含 CLT 结构和新型的结构体系和连接方式的设计内容和方法,如自攻螺钉 (self-tapping screws), 设计人员目前主要参考来自欧洲和北美的一些技术资料进行设计,并且在抗震设计中也遇到了一些挑战。

## 2 轻型木结构住宅的抗震研究

传统的轻型木结构住宅具有很好的抗震性能,但是 2011 年坎特伯雷大地震对基础设施造成了上百亿美元经济损失,其中相当一部分用于修复木结构住宅。新西兰建筑科学研究院 (BRANZ) 随机抽样调查了 350 栋住宅建筑的震害,发现轻型木结构住宅在地震中的损坏程度差异很大。如果不考虑场地液化的因素,结构布局简单的住宅受损很轻微。相比之下,布局复杂,开间又大的住宅损坏很严重,很多需要拆除重建,这主要是由于这些住宅的剪力墙的布置不规则,偏心扭转效应造成了更大的结构变形和损伤。除了抗侧力体系不均匀导致震害加剧外,此次震害调查还发现山坡上的房屋如果设计不当,损坏也很严重。新西兰地形多山,比如说在惠灵顿,很多住宅建在山坡上,如图 3 所示。山坡房屋的抗震加固也已经引起了人们的重视。



图 3 建于山坡上带有桩基的木结构住宅

Fig. 3 A wooden structure with pile foundation on the hillside

基于震后的灾害调查结果,新西兰建筑研究所 (BRANZ) 的研究人员开展了一系列提高木结构住宅的抗震韧性 (seismic resilience) 的研究项目。已完成和正在进行的项目包括了如何提高常用的石膏板剪力墙的抗侧性能,测试楼面和屋面体系的实际平面内刚度,混合抗侧力体系中地震力的分配,传递和变形协调问题,以及如何对山坡上的住宅设计有效的抗侧支撑等。

## 2.1 屋面和楼面刚度试验

当房屋有不均匀的抗侧力体系时，扭转效应与楼面或屋面平面内刚度密切相关。现有的 NZS3604 规范虽然对于剪力墙的不规则布置有所限制，需要满足基于经验的构造要求，但是其设计假定并不考虑楼面或屋面实际平面内刚度对剪力墙地震作用的影响。如果实际的楼面或屋面平面内刚度较大，剪力墙的不规则布置会放大不利的扭转效应，墙体变形增大，对结构造成更大的破坏。依照实际的建造方法，BRANZ 最近测试了一系列木结构住宅中常用的屋面体系，如图 4 所示。研究发现采用石膏板面板的屋面体系的平面内刚度比较高，柔性屋面的假定似乎并不适用<sup>[4]</sup>。



图 4 按照 NZS3604 规范建造的普通屋盖的平面内刚度试验

Fig.4 In-plane stiffness test of a common roof constructed in accordance with the NZS 3604 specification

## 2.2 剪力墙优化设计

新西兰的轻型木结构住宅中主要采用石膏板剪力墙，并采用专门的石膏板螺钉连接木骨架。BRANZ 通过大量的试验得出了石膏板剪力墙的设计强度和延性指标，并用于 NZS3604 规范中。而北美的轻型木结构住宅大量采用定向刨花板（OSB）或胶合板（plywood）作为剪力墙的墙面板。石膏板为脆性材料，作为木基板材的定向刨花板和胶合板的大部分力学指标要优于石膏板。但是，石膏板兼具了防火功能且价格相对便宜，而且轻型木结构住宅所受荷载较小，因此石膏板剪力墙在新西兰住宅体系中非常普及。由于石膏板变形能力有限易开裂，在强震作用下会导致高昂的修复成本，工程界开始考虑更新 NZS3604 以提高木结构住宅的抗震韧性，目前考虑的研究内容有：

1) 优化石膏板剪力墙的设计来提高住宅的抗震性能，包括通过控制层间变形，避免剪力墙的不规则布置来提高住宅的抗侧刚度。

2) 对于地震作用较大的情况下，采用木基结构板材如胶合板作为主要的剪力墙墙面覆盖材料以提高剪力墙的抗侧性能和体系的延性。

3) 根据现有地震经济损失资料如地震修复的成本，进一步量化不同剪力墙设计建造成本与经济损失之间的关系。

## 2.3 山坡住宅的基础设计

震后灾害调查发现，山坡上住宅屋的损坏多数是由于上部主体结构和地基之间的抗侧力体系损坏引起的，主体结构和基础之间的桩支撑体系（或其他抗侧力体系）通常有变形不协调的问题。如果设计不当，地震中刚性支撑体系先损坏，然后较柔的支撑体系开始受损，导致整个房屋严重倾斜。为了使设计更为合理，BRANZ 已经开展了山坡房屋桩基的相关研究，包括进行桩基实地测试，如图 5 所示。其研究结果也可用于现有房屋的抗震加固设计。



图 5 山坡木结构住宅桩基现场试验

Fig. 5 Field test of pile foundation for hillside residential timber structure

## 3 多高层木结构体系的抗震研究

### 3.1 高强度节点研究

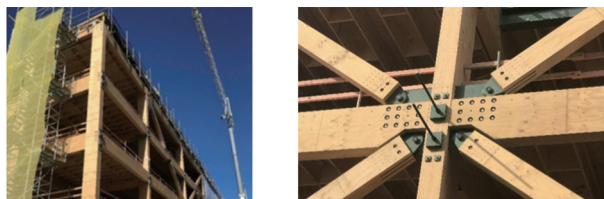


图 6 Beatrice Tinsley 教学楼和采用的内插钢板的销连接和螺栓连接

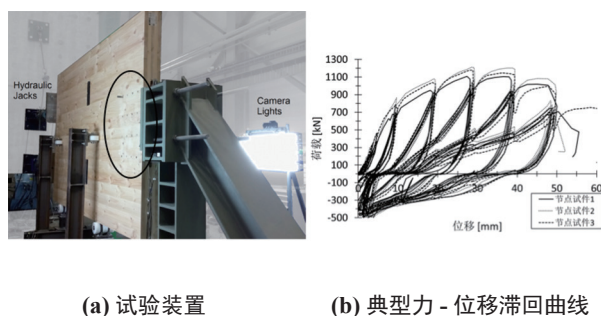
Fig. 6 Pin and bolt connections for the Beatrice Tinsley teaching building and the interpolated steel plates used

在重型木结构中，销连接和螺栓连接是常用的节点形式。如图 6 所示，2019 新建的坎特伯雷大学教学楼



(Beatrice Tinsley Building) 大量采用了带内插钢板的螺栓连接和销连接。只要设计合理, 避免发生木材横纹劈裂和顺纹剪切等脆性破坏模式, 这类节点通常具有很好的延性, 可耗散地震能量。

木结构在地震作用下主要依靠连接节点变形耗能来提供结构的延性。在新西兰, 能力设计法 (capacity design) 是常用的结构抗震设计方法, 该方法可以保证结构体系具有一定的延性和耗能能力并且避免发生脆性破坏。能力设计法需要在结构体系中明确指定延性单元 (构件或节点) 及其超强系数  $\gamma_{Rd}$  (overstrength factor), 并且采用此超强系数来提高非延性单元的设计荷载并进行设计。举例来说, 轻型木剪力墙的延性主要来自于墙面板和木骨架之间的钉连接, NZS3603 规范规定了此类钉连接的超强系数  $\gamma_{Rd}$  为 2.0, 这意味着除钉连接以外的剪力墙构件和节点 (包括墙面板, 抗拔件和抗剪件等) 的设计需要按照两倍于钉连接设计采用的地震作用。然而对于其它的连接形式, 当前各国的木结构规范并未给出超强系数, 所以对于其他类型的抗侧力体系如 CLT 剪力墙, 设计人员往往会采用保守的超强系数, 结果会导致设计不够经济合理, 选用的木构件过大或非延性连接过强。



(a) 试验装置 (b) 典型力 - 位移滞回曲线

图 7 内插钢板的销钉连接试验 (16x20 销钉)

Fig.7 Pin connection test for insert steel plate (16x20 pin)

为了评估常用的销连接的超强系数, 坎特伯雷大学的研究人员进行了一系列的大型正交胶合木 (CLT) 销节点试验<sup>[5]</sup>。如图 7 所示, 该试验采用的 CLT 板厚 205 毫米, 节点内插 25 毫米钢板和 16 个直径为 20 毫米的钢销。试验结果表明, 这类节点可以提供很高的强度, 最大承载力达到了 120 吨, 在反复荷载作用下, 节点具有很高的耗能能力, 其延性系数为 5 和 6 之间。很显然, 这类强度高延性好的节点非常适用于 CLT 剪力墙中抗拔连接。此外, 试验得到了此类销连接的超强系数  $\gamma_{Rd}$  为 1.7, 可直接用于多高层 CLT 剪力墙的能力设计。

### 3.2 自复位摇摆剪力墙

Palermo 等自 2005 年开始, 提出了自复位木框架和木摇摆剪力墙的结构体系<sup>[6]</sup>。关于自复位和木制摇摆剪力墙的介绍以及抗震机制可参照相关文献<sup>[7]</sup>。自复位摇摆剪力墙是一种低损伤 (low damage) 抗震结构体系, 墙体中的预应力筋和可替换的耗能件, 可以极大地减少地震造成的结构损伤, 降低修复成本, 为多高层木结构体系提供可靠的抗震韧性。



图 8 单片剪力墙、双片耦合剪力墙和 C 型带翼缘剪力墙试验

Fig.8 Single-shear shear wall, two-piece coupling shear wall and C-type flange shear wall test

自复位摇摆剪力墙需要设置后张拉预应力筋从上到下贯穿墙体, 预应力筋的一端在基础锚固, 另一端直接锚固于墙体顶部。预应力筋中施加的应力应合理控制, 一般来说要低于钢材屈服应力的 70%。考虑到木材弹性模量比钢材和混凝土材料低, 墙体顶部锚固件的设计需要考虑木材的受压应力的合理均匀分布, 避免局部压应力过高而引起变形过大。而且, 过大的压应力会造成木材不利的蠕变效应并造成预应力筋的应力损失。最近坎特伯雷大学的研究人员提出了一种新型的带翼缘的 C 型 CLT 摇摆剪力墙体系<sup>[8]</sup>。这种剪力墙体系可以作为多高层结构的楼梯和电梯井的墙体, 通过有效的连接翼缘墙和腹板墙, 可大幅度提高墙体的抗侧刚度和强度。为了测试这一新型摇摆剪力墙的性能, 研究人员进行了单片剪力墙, 双片耦合剪力墙, 和 C 型带翼缘剪力墙的水平反复加载试验。如图 8 所示, 该试验采用了缩尺比为 2:3 的四层剪力墙, 总高度为 8.6 米。墙体为 175 毫米厚 CLT, 单片剪力墙的长度为 2 米, 双片耦合剪力墙的长度为 4 米, C 型剪力墙的腹板墙为 4 米和翼缘墙长度为 1.5 米。单片墙体中设置了四根直径为 26.5 毫米的高强无粘结后张拉预应力筋, 预应力筋张拉后引起的 CLT 墙体压应力为墙体受压承载力的 10% 左右, 所以, 在此低应力水平下, 木材的长期蠕变作用非常小, 因此预应力筋中的相应的应力损失也会比较小。

图9给出了不同剪力墙试件的荷载和侧向位移之间的关系。位移以百分比形式给出，为顶部侧移与墙高的比值。在单片剪力墙试验中没有设置耗能件，仅有4根预应力筋对墙体施加了30吨锚固力，由于**钢棒**始终处于弹性变形状态，没有耗能能力，所以剪力墙可实现完全自复位，残余变形基本为零但是在实际的应用中，单片剪力墙也需增加额外的耗能件，如U型金属阻尼器，否则只能按照弹性体系设计。很显然，与单片剪力墙相比，双片耦合剪力墙可大幅度提高墙体的刚度和强度。这是因为墙体之间增加了间距100毫米的长螺钉连接，可有效传递剪力。从荷载侧移的滞回曲线可以看出，墙体之间的连接变形和存在的摩擦也可消耗大量的能量。试验表明，C型带翼缘的剪力墙具有最佳的抗侧性能，通过在翼缘墙和腹板墙之间密布长螺钉，同时保证连接的强度，刚度和延性，剪力墙不再是传统的一维平面内剪力墙，翼缘墙对抗侧刚度和强度的贡献显著，整个C型剪力墙在墙体位移2.3%的时候，最大承载力达到了84.5吨，墙体底部的最大抗倾覆弯矩接近7000 kN.m。

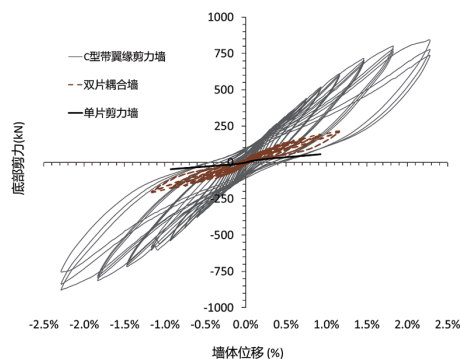


图9 剪力墙试验荷载位移曲线

Fig.9 Load displacement curve of shear wall test

### 3.3 木-钢混合结构体系

木材和钢材具有一些相似优点，且均符合工厂预制现场快速拼装的施工要求，因此钢木混合结构作为一种多高层木结构体系的发展方向，具有较好的应用前景。

在已建成的多高层木结构中，支撑体系由于抗侧承载力高，外形简洁，受力直接，得到了广泛地应用，如2019年在挪威建成的18层 Mjøstårnet 和坎特伯雷大学教学楼（图6）。这些结构中的支撑均为木支撑，木支撑通过金属连接件，如内插板和销或螺栓与木结构梁柱连接。由于木材受拉破坏表现为脆性断裂，无法依靠木材耗散能量。结构的耗能完全依赖于支撑两端金属连接

件的屈服和销轴孔周木材的挤压变形，耗能能力有限，结构的延性差，从而极大地限制了多高层木结构在地震多发区的发展。另一方面，连接中的销或螺栓屈服和孔周木材挤压变形后难以进行更换，结构的震后修复困难，也影响了多高层木结构的经济效益。为了解决以上提到的问题，坎特伯雷大学的研究人员提出将屈曲约束支撑（BRB）引入多高层木结构中代替传统木支撑，形成一种钢木混合结构<sup>[9]</sup>。屈曲约束支撑主要由包裹无粘结材料的芯材和外套筒组成，芯材与外套筒间以混凝土或砂浆填实（见图10）。混凝土和套筒限制了芯材的侧向变形，从而达到防止支撑屈曲的作用，同时由于无粘结材料的存在，混凝土并不限制芯材的轴向变形。过去的研究表明，屈曲约束支撑在承受拉力和压力的情况下，表现出相同的滞回性能和优良的耗能能力<sup>[10]</sup>，因此，如果能使用屈曲约束支撑代替木支撑，将显著改善结构的延性。

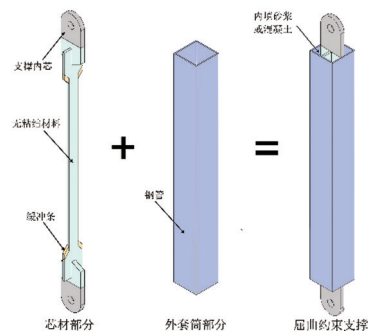


图10 屈曲约束支撑构造

Fig.10 Buckling restraint support structure

为了验证混合结构的可行性，以6层商业办公楼建筑为设计原型，在坎特伯雷大学的结构工程试验室中，以**1:1**比例搭建了两榀单层人字形中心支撑胶合木框架（见图11）。框架跨度为8米，层高为3.6米。屈曲约束支撑与节点板采用销轴连接以减少传递到节点板中的弯矩。两榀框架的节点板与木梁柱构件分别采用了销轴**链接**和自攻螺钉**链接**（见图12），将侧向力从支撑传递到木结构中，最后传递到基础。图14为两榀框架的滞回曲线，从图中可见，两榀框架的滞回曲线饱满，屈曲约束支撑的加入，显著改善了耗能性能。通过采用能力设计法，设定屈曲约束支撑为延性构件，在地震作用下以塑性变形的形式耗散能量，可以保护连接和木结构构件。从图13中可见，除了由于屈曲约束支撑销轴连接产生的滑移，未观察到明显的捏缩效应，说明连接

与木构件并未受到损伤，从而验证了这一设计理念是可行的。由于连接与木构件完好，只需合理设计控制残余变形，确保非结构构件在震后仍可继续使用，建筑即可在更换屈曲约束支撑后继续工作，从而提高了结构的震后可恢复性与经济效益。

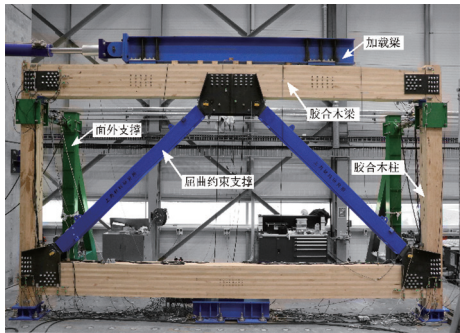
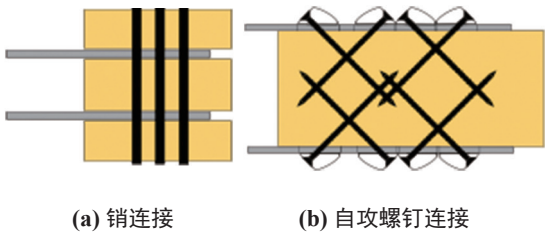


图 11 带屈曲约束支撑的胶合木框架

Fig. 11 Glued wood frame with buckling restraint support



(a) 销连接 (b) 自攻螺钉连接

图 12 节点板与梁柱的连接方式

Fig. 12 How to connect the gusset plate to the beam and column

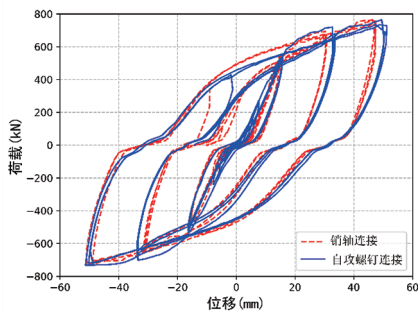


图 13 框架滞回曲线

Fig. 13 Frame hysteresis curve

4 结论

本文介绍了轻型木结构和多高层木结构在新西兰的应用和相关的设计规范以及最新的研究进展。2011 年坎特伯雷地震的建筑灾害调查表明，木结构具有优越的抗震性能，能完全满足大震不倒的设计要求。对于轻型

木结构住宅而言，如何有效提升抗震韧性，控制灾害损失，降低修复成本是当前一个更为迫切的任务，相关的研究也已经展开。多高层木结构的抗震研究也主要是着眼于如何提高抗震韧性，研究人员提出了新型的抗侧力体系，通过能力设计法，明确定义结构中的耗能单元，保护木构件和节点。与轻型木结构相比，多高层木结构所受的地震荷载要大的多，相关的研究重点也放在如何提高抗侧力体系的抗侧强度和刚度，同时满足承载力和控制变形的设计要求。

参考文献

[1] 新西兰历史网站 <https://nzhistory.govt.nz/page/christchurch-earthquake-kills-185>

[2] NZS 3603:1993 Timber Structures Standard, Standards New Zealand, Wellington, New Zealand

[3] NZS 3604:2011. Timber Framed Buildings. Standards New Zealand, Wellington, New Zealand

[4] Liu, A., Li, M., and Shelton R. 2019 “Experimental studies on in-plane performance of plasterboard sheathed ceiling diaphragms.” Bulletin of New Zealand Society of Earthquake Engineering. 52(2):95-106

[5] Ottenhaus, L., Li, M. and Smith T. 2018 “Structural performance of large-scale dowelled CLT connections under monotonic and cyclic loading” Engineering Structures 176:41-48

[6] Palermo A., Pampanin S., Buchanan A., Newcombe M. Seismic design of multi-storey buildings using Laminated Veneer Lumber (LVL) [C]//2005 New Zealand Society for Earthquake Engineering Conference, Taupo, New Zealand, 2005.

[7] 李征，周睿蕊，何敏娟，李明浩. 震后可恢复功能木结构研究进展 [J]. 建筑结构学报，2018，39(9): 10-21.

[8] Brown, J., Li, M., Palermo, A., Sarti, F. and Pampanin, S. 2019. “Preliminary experimental testing of post-tensioned timber core-wall systems” Proc., 5th Pacific Timber Engineering Conference, Brisbane, Australia

[9] Dong, W., Li, M., Morris, H., Lee, C-L., MacRae, G. and Abu, A. 2019. “Lateral behavior of glulam frames with buckling restrained braces (BRBs)” Proc., 5th Pacific Timber Engineering Conference, Brisbane, Australia

[10] 谢强，赵亮. 屈曲约束支撑的研究进展及其应用 [J]. 钢结构，2006，21(1): 46-48.